

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

KATEDRA MATERIÁLU

Studijní program: B2341 Strojírenství

Studijní obor: 3911R018 Materiály a technologie

Zaměření: Materiálové inženýrství

**Využití Barkhausenova šumu pro kontrolu tloušťky
karbonitridované vrstvy**

**Using of Barkhausen Noise for the Control of carbonitriding layer
thickness**

KMT – B – 198

Antonín Bláha

Vedoucí práce: doc. Ing. Karel Daďourek, CSc.

Konzultanti: Ing. Josef Podkovičák – ŠKODA AUTO a.s.

Ing. Lucie Vrkoslavová

Počet stran: 46

Počet tabulek: 07

Počet obrázků: 41

Počet příloh: 07

Datum 16.05.2012

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Dne 16.05.2012

.....

Antonín Bláha

Abstrakt

Cílem bakalářské práce bylo vyjádření závislosti magnetoelastického parametru na tloušťce karbonitridované vrstvy jádra synchronní spojky. Výsledkem je graf, který se dá použít ke kontrole karbonitridované vrstvy jádra synchronní spojky. Toho bylo dosaženo pomocí výsledků z měření přístrojem Rollscan 300 (což je přístroj využívající metodu Barkhausenova šumu) a z metalografické analýzy.

KLÍČOVÁ SLOVA

- Barkhausenův šum
- Chemicko-tepelné zpracování
- Karbonitridace
- Metalografie

Abstract

The aim of this thesis was to express, depending of the magnetoelastic parameter on the carbonitriding layer thickness of core synchronic coupling. The result is a graph that is applicable to control of the carbonitriding layer of core synchronous coupling. This was achieved by using the results of the measurement device Rollscan 300 (which is a device using the method of Barkhausen noise) and metallographic analysis.

KEYWORDS

- Barkhausen noise
- Chemical heat treatment
- Carbonitriding
- Metallography

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce panu doc. Ing. Karlu Daďourkovi, CSc. za vstřícný přístup a odborné vedení. Dále děkuji za četné rady svým konzultantům Ing. Josefu Podkovičákovi a Ing. Lucii Vrkoslavové. Děkuji také svým rodičům a Bc. Evě Pánkové za povzbuzování, podporu a veškerou pomoc.

Dne 16.05.2012

.....

Antonín Bláha

„I pád na držku je pohyb dopředu“

(Anonymus)

„Bolest je jen slabost opouštějící tělo“

(BearGrylls)

Obsah

1. Úvod	7
2. Teoretická část.....	9
2.1 Jádru synchronní spojky	9
2.1.1 Tepelné zpracování jádra synchronní spojky	10
2.2 Metoda analýzy Barkhausenova šumu	11
2.3 Příprava metalografických vzorků	16
2.4.1 Karbonitridace	20
3. Experimentální část	22
3.1 Jádru synchronní spojky	22
3.1.1 Zvolení vhodného místa k měření	22
3.1.2 Základní nastavení přístroje Rollscan 300	23
3.1.3 Měření magnetoelastického parametru (mp)	24
3.1.4 Metalografie	26
3.1.4.1 Odběr vzorku	26
3.1.4.2 Zalisování vzorku	26
3.1.4.3 Broušení a leštění vzorku	28
3.1.5 Metalografie jádra synchronní spojky	29
3.1.6 Měření karbonitridované vrstvy jádra synchronní spojky	30
3.1.7 Grafické řešení	31
5. Diskuse výsledků	36
6. Závěr.....	38
7. Seznam použité literatury.....	39
8. Přílohy	40

1. Úvod

Cílem této práce je vyjádření závislosti magnetoelastického parametru na tloušťce karbonitridované vrstvy jádra synchronní spojky. Tento díl je obsažen v převodovce MQ 200. Výsledkem bude graf, který bude možné použít ke kontrole karbonitridované vrstvy jádra synchronní spojky. Toho chci dosáhnout pomocí výsledků z měření přístrojem Rollscan 300 (což je přístroj využívající metodu Barkhausenova šumu) a z metalografické analýzy.

Vzorky jádra synchronní spojky byly vyrobeny ve firmě Škoda AUTO. Tyto vzorky byly při karbonitridaci odebírány z komorové pece s rozdílnými časy (od 40 do 160 minut po 20minutách).

Samotná měření s přístrojem Rollscan 300 a metalografické analýzy byly provedeny na Technické univerzitě v Liberci.

Převodovka MQ 200 je pětistupňová převodovka určená pro motory s točivým momentem až 200 Newtonmetrů (Nm). Její sériová výroba začala ve firmě Škoda Auto v roce 2000. Tato převodovka je také dodávána i do koncernu Volkswagen (Ing. Podkovičák, IV. 2012, in verb).

Jádro synchronní spojky je pevně nasazeno na hnaném hřídeli a je součástí synchronní spojky, která se stará o vyrovnaní otáček hřídele a kola dané rychlosti při řazení jednotlivých stupňů. Toto uspořádání umožňuje hladké a bezhlučné řazení (Ing. Podkovičák, IV. 2012, in verb).

Rollscan 300 je digitální analyzátor Barkhausenova šumu. Je navržen pro kontrolu kvality povrchu a podpovrchových vad týkajících se změn v napětí a mikrostruktuře v široké řadě strojírenských materiálů.

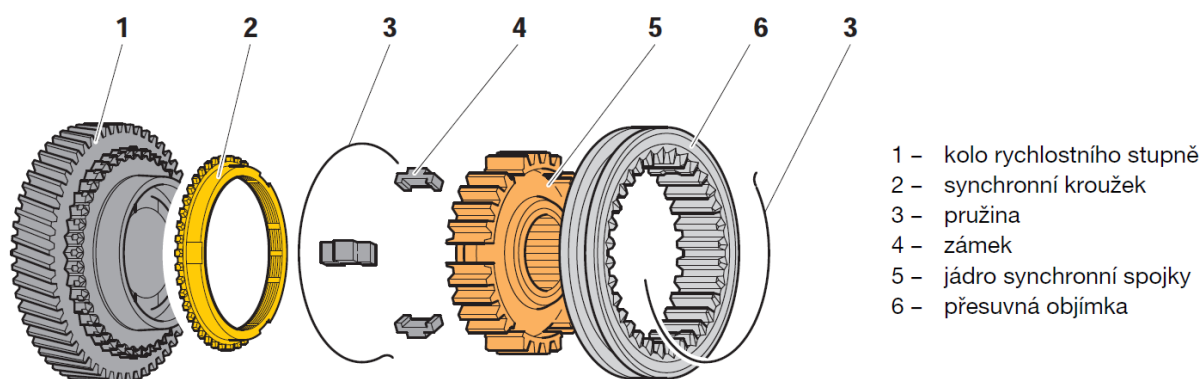
Kontrola pomocí Rollscanu je velmi rychlá. Může se snadno přizpůsobit rychlosti výroby většiny výrobních linek, umožňuje okamžitou kontrolu kvality. Společnosti, které využívají Rollscan, mohou na základě výsledků významně zlepšit kvalitu a ušetřit na výdajích za materiál i pracovní sílu.

Rollscan je velmi flexibilní díky široké řadě dostupných snímačů. Pomocí Rollscanu 300 můžeme úspěšně testovat pístní čepy, ozubení, ložiskové kroužky a válečky, vačkové a klikové hřídele, díly leteckých podvozků a mnoho dalších [2].

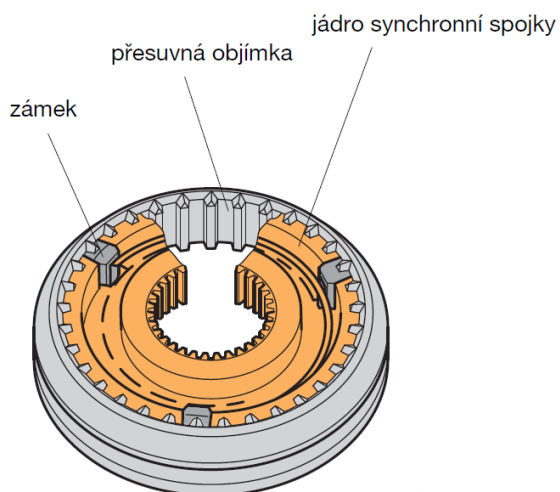
2. Teoretická část

2.1 Jádru synchronní spojky

Jádru synchronní spojky je vsunuto do přesuvné objímky. Je složeno z vnějšího a vnitřního ozubení. V jádru synchronní spojky jsou vybrány pro zámky, které jsou pomocí dvou pružin tlačeny směrem od středu. V neutrální poloze je přesuvná objímka působením obou pružin udržována ve středové poloze.



Obrázek č. 1. – Konstrukce zámkové synchronizace – jednotlivé části [1]



Obrázek č. 2. – Zámková synchronizace po kompletaci [1]

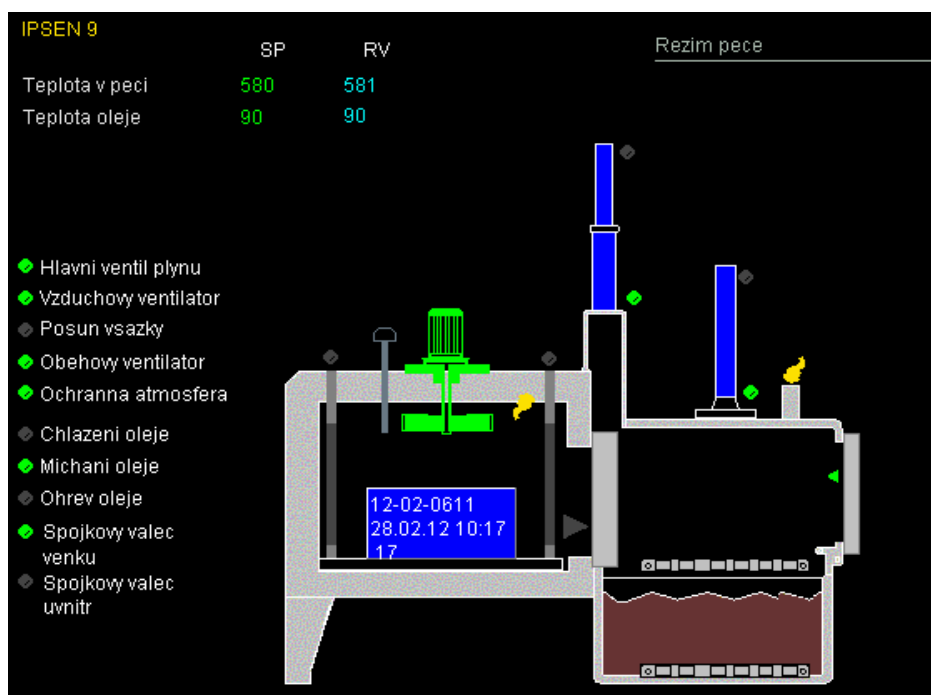
2.1.1 Tepelné zpracování jádra synchronní spojky

Popsaný technologický postup tepelného zpracování jádra synchronní spojky je používán ve firmě Škoda AUTO a.s.

1. Praní (kusy musí být čisté před procesem CHTZ).
2. Ohřev materiálu (probíhá v endoatmosféře).
3. Chemicko-tepelné zpracování (karbonitridace).
4. Ochlazení (kalící olej TK-46).

Celý proces chemicko-tepelného zpracování (karbonitridování) dílu jádra synchronní spojky je v závodě Škoda AUTO plně automatizován. Karbonitridace je prováděna v komorové peci, která má řízenou ochrannou atmosféru. Součástí pece je i ochlazovací lázeň.

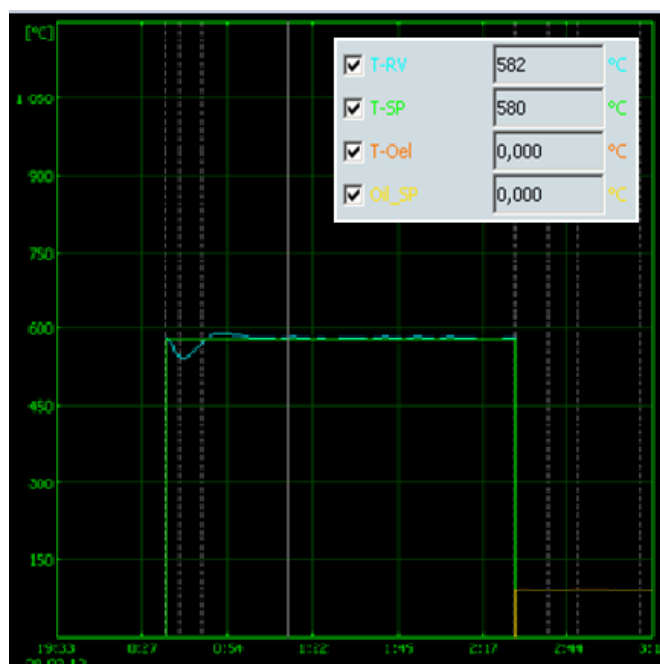
Pomocí automatického zavažeče jsou díly vloženy do předkomory. Poté podle programu č. 40 proběhne jejich automatické zpracování. Následuje proces ochlazení, který probíhá v kalícím oleji TK-46. Po ukončení procesu jsou díly vyndány z ochlazovací lázně a nechají se odkapat, aby se zabránilo zbytečnému vniknutí oleje do pračky (Ing. Podkovičák, IV. 2012, in verb).



Obrázek č. 3. – Schéma komorové pece (Ing. Podkovičák 2012).

Tab. č. 1. – Program č. 40. (Ing. Podkovičák 2012).

krok č.	místo	operace	teplota[°C]	čas[min.]
1.	hlavní komora	ohřev na teplotu	580	30
2.	hlavní komora	výdrž na teplotě	580	95
3.	chladicí lázeň	ochlazení	90	20
4.	navazecí komora	odkapání		20



Obrázek č. 4. – Průběh ohřevu a ochlazení (Ing. Podkovičák 2012).

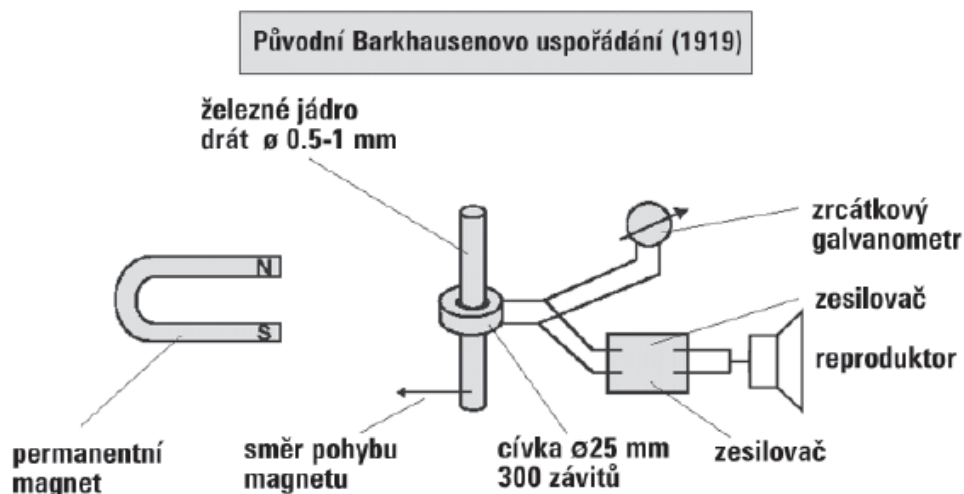
Tab. č.2. – Složení karbonitridační atmosféry (Ing. Podkovičák 2012).

objem / hodinu	plyn	složení
5m ³ / h	Čpavek	100%
5m ³ / h	Endoplyn	60%N 20%H2 20%CO

2.2 Metoda analýzy Barkhausenova šumu

Jev zvaný Barkhausenův šum byl poprvé popsán v roce 1919 pod názvem “Dvě pozoruhodnosti objevené pomocí nového zesilovače”.

Samotný jev popsal profesor Barkhausen. Uspořádání, které profesor Barkhausen použil je na obrázku č. 5.



Obrázek č. 5. – Původní Barkhausenovo uspořádání [5]

Princip Metody analýzy Barkhausenova šumu spočívá v tom, že když přiblížíme či vzdálíme magnet od jádra, je v reproduktoru slyšitelné chrastění či praskání. Tento šum souvisí s nespojitostmi v procesu magnetizace feromagnetického materiálu. Později bylo prokázáno, že efekt závisí na tvrdosti ocelového jádra v cívce (s rostoucí tvrdostí intenzita praskání klesá). Dále bylo zjištěno, že tahové napětí ve směru magnetizace stimuluje výrazné chrastění, zatímco tlakové napětí působí opačně.

Z této metody se stala na konci sedmdesátých let průmyslově používaná metoda detekce strukturních a napětíových změn v materiálech. Uplatnění nachází v tepelném zpracování nebo v hodnocení integrity povrchu po obrábění [5].

Feromagnetické materiály obsahují malé magnetické oblasti, které si lze představit jako jednoduché tyčové magnety. Tyto oblasti se nazývají domény. Každá doména je magnetizována podél určitého krystalografického směru snadné magnetizace. Domény jsou navzájem odděleny přepážkami, které se nazývají doménové stěny nebo také Blochovy stěny. Magnetické pole způsobuje pohyb magnetických doménových stěn tam a zpět. Aby se doménová stěna mohla pohnout, musí se magnetická doména na jedné straně stěny zvětšit a zároveň doména na protilehlé straně stěny se musí smrštit. Výsledkem je změna celkové magnetizace vzorku.

Jestliže je cívka z vodivého drátu umístěna blízko vzorku v okamžiku pohybu doménových stěn, výsledné změny v magnetizaci indukují elektrické pulsy v cívkce [2].

První elektrické pozorování pohybu doménových stěn prováděl profesor Barkhausen v roce 1919. Zjistil, že proces magnetizace, který je charakterizován hysterezní křivkou, ve skutečnosti není spojitý, ale je prováděn v malých skocích, které vznikají, jestliže se magnetické domény orientují podél vnějšího magnetického pole. Jestliže se všechny elektrické pulsy, vznikající pohybem jednotlivých doménových stěn, shrnou dohromady, vzniká signál, který se nazývá Barkhausenův šum [6].

Barkhausenův šum má pro většinu materiálů frekvenční spektrum začínající na magnetizačním kmitočtu a končí přibližně na 250 kHz. Signál je exponenciálně tlumen v závislosti na vzdálenosti, kterou projde uvnitř materiálu. Primární příčinou tlumení jsou vířivé proudy indukované při šíření signálu vznikajícího pohybem domén.

Útlum určuje hloubku, ze které lze informaci získat (měřicí hloubku).

Hlavní faktory ovlivňující tuto hloubku jsou:

- frekvenční rozsah generovaného signálu,
- vodivost a permeabilita zkoušeného materiálu.

Při běžných aplikacích se měřená hloubka pohybuje mezi 0,01 a 1,5 mm.

Na intenzitu Barkhausenova šumu mají vliv dva významné materiálové parametry. Jedním z nich je přítomnost a rozložení pružných napětí, která ovlivňují cestu, po které se domény ubírají směrem ke snadné orientaci ve směru magnetizace. Tento jev, kdy elastické vlastnosti ovlivňují doménovou strukturu a magnetické vlastnosti, se nazývá magnetoelastická interakce. U materiálů s pozitivní magnetostrikcí (železo, většina ocelí, kobalt) tlakové napětí snižuje intenzitu Barkhausenova šumu, zatímco tahové napětí ji zvyšuje. Tuto skutečnost lze využít k tomu, že měření intenzity Barkhausenova šumu použijeme ke stanovení zbytkového napětí. Z měření lze určit i směr základních napětí.

Druhým významným parametrem, který ovlivňuje úroveň Barkhausenova šumu, je metalurgická struktura. Tento jev může být hrubě popsán s použitím pojmu tvrdost: intenzita signálu spojitě klesá s rostoucí tvrdostí. Je tomu tak proto, že pohyb doménových stěn je blokován na mřížkové úrovni v zásadě stejnými překážkami a defekty jako pohyb dislokací při plastické deformaci. Měření Barkhausenova šumu tedy poskytuje informaci o mikrostrukturním stavu materiálu [5].

Většina běžných povrchových defektů, jako jsou např. spáleniny po broušení, měkká místa a měkké hrany nebo přikalené povrchy, oduhličené plochy atd., způsobují změny v napětí a mikrostruktuře a mohou být detekovány s použitím magnetoelastické metody.

Různé dynamické procesy, jako např. tečení a únava, rovněž způsobují změny v napětí a mikrostruktuře a mohou být rovněž monitorovány pomocí magnetoelastických měření.

Praktické aplikace magnetoelastické metody Barkhausenova šumu mohou být rozděleny do tří oblastí:

1. Vyhodnocení zbytkových napětí. Mikrostrukturální parametry musí být rozumně řízeny, tzn. musí mít charakter statistického pozadí.
2. Vyhodnocení změn mikrostruktury. V tom případě musí mít úroveň zbytkového napětí charakter statistického pozadí.
3. Kontrola poruch, které mohou způsobovat změny jak v napětí, tak i ve struktuře [2].

Měřicí přístroj

Zpravidla se skládá z kalibrační jednotky, měřicí a řídicí jednotky a měřicího počítače. Pro jednotlivá měření je důležitým prvkem přístroje snímač. Ten může být přizpůsoben pro konkrétní účel svým tvarem. Vždy však obsahuje dvojici feromagnetických břitů, kdy jeden slouží k magnetizaci, zatímco druhý snímá odezvu [5].

Snímač

Snímače Barkhausenova šumu jsou konstruovány pro statické i pro dynamické měření. Mohou být použity pro kontrolu kvality, např. pro detekci spálenin po broušení nebo chyb v tepelném zpracování nebo pro měření zbytkového napětí.

Snímač se skládá z několika základních částí: snímací pólový nástavec, magnetizační pólové nástavce, krytky, trimru, kabelu a konektoru. Magnetizační a snímací pólové nástavce mohou být pevné nebo vyměnitelné. Pokud snímač neobsahuje magnetizační pólové nástavce, je možné v některých speciálních případech použít externí magnetizaci. Tvar snímače se liší podle měřeného povrchu [2].



Obrázek č.6. – Jeden ze snímačů Barkhausenova šumu[2].

Použití metody

Je to metoda nedestruktivní, což je vhodné pro nepřetržitou kontrolu dílu při sériové výrobě. Jelikož je měřen magnetoelastický parametr (MP), který závisí na více parametrech, je nutné při každé změně ve výrobě (obrábění, tepelné zpracování, materiál) provádět kalibraci nebo jiné měření (např. difrakční analýzu) k určení přípustné hranice MP. Nevýhodou této metody měření je omezení pouze na feromagnetické kovy (RNDr. Malec, III. 2012, in verb).

2.3 Příprava metalografických vzorků

Metalografie je nauka, která se zabývá pozorováním a zkoumáním vnitřní stavby kovů a slitin.

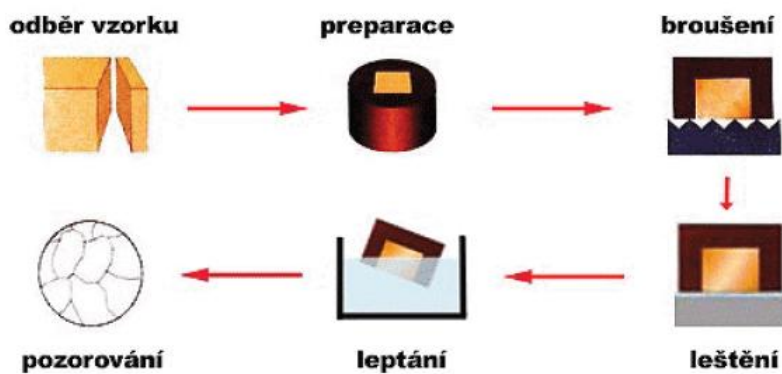
Cílem metalografie je zviditelnění struktury materiálu a následné studium pomocí optického či elektronového mikroskopu.

Umožňuje:

- Zjišťovat souvislosti mezi strukturou materiálu a jeho vlastnostmi,
- sledovat a kontrolovat vlastnosti materiálu při jeho výrobě a zpracování,
- hledat příčiny vad materiálu nebo vysvětlit důvody selhání nějakého zařízení.

Postup:

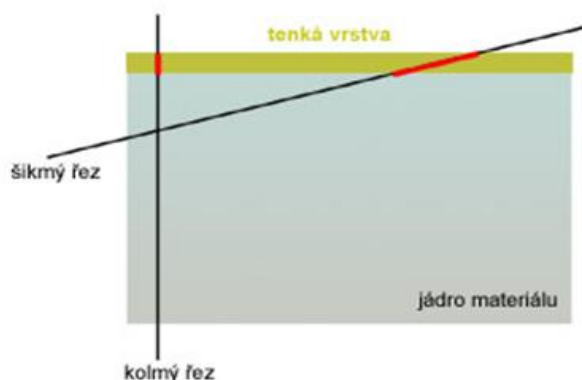
- Odběr vzorku.
- Označení vzorku + preparace.
- Broušení vzorku.
- Leštění vzorku.
- Leptání vzorku.
- Pozorování vzorku.



Obrázek č.7. – Příprava metalografických vzorků [4]

Příprava vzorků:

A. Odběr - před samotným odběrem vzorku musíme nejdříve stanovit odkud odebrat vzorek, kolik vzorků a jakým způsobem. Odběr vzorku se nejčastěji provádí na rozbrušovačkách (obrázek č. 9.). Odebíraný vzorek musí plně charakterizovat studovaný materiál. Nesmí dojít k změně struktury (deformace, ohřev). V případě potřeby se mohou provádět i takzvané šikmé řezy viz. obrázek č. 8.



Obrázek č.8. – Řez

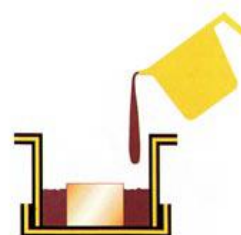


Obrázek č.9. – Struers Labotom-3

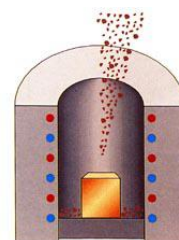
B. Označení a preparace - preparací vzorku se zajistí snadnější manipulace s malými částmi materiálu.

Preparace se rozděluje:

- **Preparace za studena** - používá se u vzorků náchylných ke změnám struktury za vyšších teplot. Vzorek se zalije kapalinou, která poté ztuhne.



- **Preparace za tepla** - vzorek se v tlakové nádobě zasype speciálním práškem, který se roztaví a dokonale obklopí studovaný vzorek.



C. Broušení – cílem broušení je dosáhnout rovinného povrchu vzorku s minimálním poškozením.

Broušení je charakterizováno intenzivním úbytkem hmotnosti vzorku. Vzniká obrus, což je množství materiálu odebraného při broušení za jednotku času [$\mu\text{m}/\text{min}$]. Cílem broušení je získat na povrchu vzorku minimální nerovnosti a odstranit tepelně ovlivněnou část materiálu od řezání.

Typy broušení:

- **Ruční** – provádí se na sadě brusných papírů s různou zrnitostí. Brusný pohyb je jedním směrem, při přechodu na jemnější papír se vzorek brousí ve směru kolmém na směr předcházející.
- **Mechanické** – používají se metalografické brusky. Vzorek se přitlačuje rukou na brusný papír, který je uchycen na rotujícím vodorovném kotouči. Broušení probíhá většinou za mokra pod vodou, což dovoluje vyšší rychlost pohybu brusného papíru. I v tomto případě při přechodu na jemnější papír se vzorek brousí ve směru kolmém na směr předcházející. Používají se speciální metalografické papíry. Po broušení se vzorek oplachuje vodou.

D. Leštění – na rozdíl od broušení, při leštění nedochází k úbytku materiálu z povrchu vzorku. Provádí se vždy na rotujícím kotouči potaženém látkou (samet, kord, flanel, satén...) za pomoci leštící suspenze (oxid hlinitý Al_2O_3 , oxid chromitý Cr_2O_3 , oxid hořečnatý MgO). Vzorkem se pohybuje proti směru otáčení kotouče, dokud není dosaženo zrcadlového lesku. Poté se vzorek opláchne a osuší. Po vyleštění lze provádět některá metalografická pozorování na mikroskopu. U litin je to např. zjišťování tvaru, velikosti a rozložení grafitu a jeho množství. U ocelí zjišťujeme přítomnost nekovových vměstků.

E. Leptání – Cílem je zviditelnění struktury. Nejčastěji je používáno chemické leptání pomocí chemického činidla (leptadlo). Vzorek se ponoří do leptadla, nebo se leptadlo nanáší na vzorek vatovým tampónem a potírá se. Leptání se provádí kratší dobu a vícekrát než jednou, dlouhé leptání je otázkou zkušenosti. Následně se vzorek důkladně opláchne (voda + alkohol) a usuší proudem vzduchu.

Hranice zrn se zviditelňují tak, že leptadlo na nich působí prohloubeniny. Dopadající paprsky vytváří na hranicích zrn stíny, které se poté pozorují.

Plošné leptání – různá rozpustnost jednotlivých zrn vlivem jejich různé krystalografické orientace, v rámci jednoho zrna jsou výstupky k povrchu orientovány stejným směrem → můžeme od sebe odlišit jednotlivá zrna.

F. Pozorování – struktura se pozoruje na optickém či elektronovém mikroskopu. Nejčastěji se používá optický metalografický mikroskop. K zobrazení struktury se využívá odraženého světla od vyleštěného a naleptaného povrchu vzorku.

Optický mikroskop se skládá ze zdroje světla a dvou základních soustav čoček – objektiv a okulár [8].

2.4 Chemicko-tepelné zpracování

Jedná se o sycení povrchu oceli za pomoci difuze a to při zvýšené teplotě od 500 do 1000°C (Ing. Podkovičák, IV. 2012, in verb). K sycení může docházet v kapalném, pevném, nebo v plynném prostředí. Dochází jak ke změně struktury, tak ke změně chemického složení povrchu materiálu. Mezi postupy nejvíce rozšířené patří sycení povrchu uhlíkem (cementování), dusíkem (nitridování), uhlíkem i dusíkem (nitrocementování, karbonitridování). Při tomto zpracování materiálu můžeme dosáhnout vlastností, které se jinak vzájemně vylučují. Což je například tvrdý povrch a houževnaté jádro materiálu [7].

Cílem chemicko-tepelného zpracování bývá nejčastěji zvýšení tvrdosti povrchu, odolnosti proti opotřebení, zvýšení odolnosti proti cyklickému namáhání (únavě) – to vše při zachování houževnatého jádra. Řada způsobů chemicko-tepelného zpracování

zvyšuje také (nebo převážně) odolnost výrobků proti korozi a proti žáru (např. hliníkování, difuzní chromování, boridování apod. [3].

Pro chemicko-tepelné zpracování se užívají jako aktivní prostředí látky plynné, kapalné nebo sypké (tuhé). Při dostatečně vysoké teplotě ve styku s povrchem oceli uvolňují tato prostředí rozkladem molekul sloučenin (disociace) příslušný prvek v atomárním stavu (tzv. aktivní atomy), který vstupuje do povrchu oceli (adsorpce) a pohybuje se mřížkou železa (difúze) ve směru koncentračního spádu (ve směru od povrchu). Za základní dílčí pochody při chemicko-tepelném zpracování lze proto považovat disociaci, absorpci a difúzi. Intenzita těchto dílčích pochodů, tzn. rychlost, s jakou se dosáhne nasycení do požadované hloubky, závisí na druhu oceli, chemickém složení a aktivitě prostředí, druhu prvku, kterým je povrch oceli syčen, teplotě, při níž difúzní reakce probíhají atd. [7].

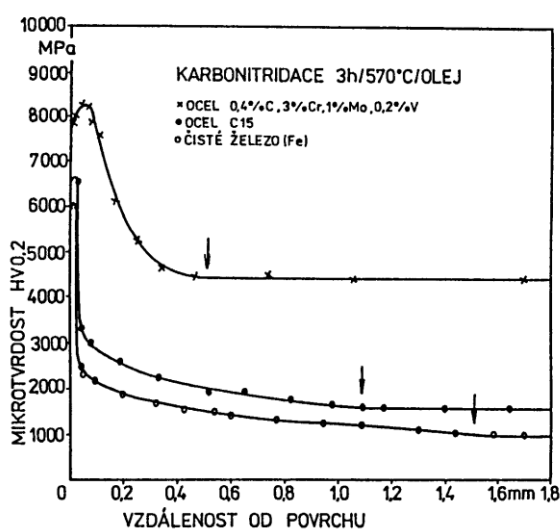
2.4.1 Karbonitridace

Podstata karbonitridace spočívá v nasycování povrchu oceli uhlíkem a dusíkem při teplotách nižších než teplota A_{c1} , obvykle za teplot 560 až 620 °C. Účelem tohoto zpracování je vytvoření homogenní ϵ vrstvy karbonitridů (tzv. bílé vrstvy event. mezivrstvy), která je relativně tvrdá, má dobré třecí vlastnosti, vysokou odolnost proti zadírání a zlepšené korozní vlastnosti [3]. Pro karbonitridování se používají atmosféry tvořené směsí čpavku s přídavkem uhlovodíků [7].

Tento pochod probíhající při nižších teplotách, je analogický nitridaci. Rozdíl oproti nitridaci je v tom, že se u karbonitridace přidává uhlík a probíhá za vyšších teplot (Ing. Podkovičák, IV. 2012, in verb). Při běžných nitridacích v suchém plynném amoniaku je zvýšení tvrdosti způsobeno hlavně nitridy železa $\gamma \times (\text{Fe}_4\text{N})$. Rozpustnost uhlíku v těchto nitridech je minimální. Zvýšenou rozpustností dalších prvků (uhlík, kyslík apod.) se vyznačuje nitrid $\epsilon (\text{Fe}_{2,3}\text{N})$. Při tomto zpracování se na povrchu součásti vytváří vrstva karbonitridu (oxikarbonitridu) ϵ o hloubce 10 až 50 μm , která obvykle obsahuje přes 8 %N, přes 2 %C a cca 1 % O_2 (viz. obrázek č. 10).

Vrstva má tvrdost blížící se 1000 HM a je vysoce odolná proti zadírání a otěru. Pod touto vrstvou nitridů proniká dusík do feritu do hloubky až 1 mm a zpevňuje jej na 300 až 400 HV.

Hloubka průniku je závislá na druhu oceli, u legovaných ocelí se hloubka průniku snižuje. Tato tzv. difúzní vrstva podporuje nosnost vrstvy karbonitridů a zvyšuje únavovou pevnost karbonitridovaných výrobků. Jestliže proces karbonitridace probíhá za teplot vyšších než eutektoidní teplota v diagramu Fe-N ($590\text{ }^{\circ}\text{C}$), je vhodné provádět ochlazování po karbonitridaci do oleje. Tímto způsobem se dosáhne vyššího zpevnění difúzní vrstvy, jež částečně kompenzuje určitou degradaci mechanických vlastností vlivem zvýšené teploty depozice. Ochlazováním do oleje se zvyšuje mez únavy karbonitridovaných výrobků [3].



Obrázek č.10. – Průběh mikrotvrlosti karbonitridovaných vrstev [3]

3. Experimentální část

3.1 Jádru synchronní spojky



Obrázek č. 11. – Jádru synchronní spojky (Bláha 2012).

Na obrázku č. 11 je vyfoceno jádro synchronní spojky, jehož chemické složení je uvedeno v přílohách č. 1. až 3. bakalářské práce.

3.1.1 Zvolení vhodného místa k měření

Vzhledem k rozměrům univerzálního snímače (viz. obrázek č. 12.), který byl použit pro měření, bylo pro měření zvoleno místo, vyznačené na obrázku č. 13.



Obrázek č. 12. – Univerzální snímač (Bláha 2012).

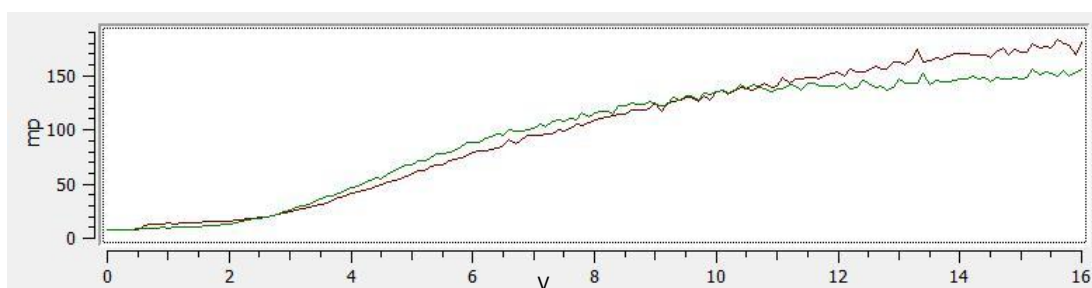


Obrázek č. 13. – Jádru synchronní spojky – označení místa zvoleného k měření
(Bláha 2012).

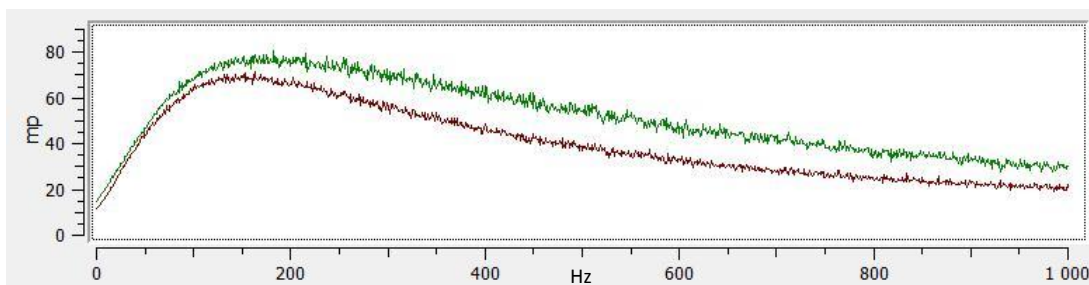
3.1.2 Základní nastavení přístroje Rollscan 300

Vzhledem k neznámému chování materiálu byl použit následující postup. Univerzální snímač byl přiložen na předem určené místo označené fixem a stisknutím tlačítka F1 proběhl přeběh magnetizačního napětí. Z grafu uvedeném na obrázku číslo 14. (prebĕh magnetizačního napětí) bylo stanoveno optimální magnetizační napětí.

Stejným postupem byl stanoven přebĕh magnetizační frekvence. Z grafu uvedeném na obrázku číslo 15. (prebĕh Magnetizační frekvence) byla určena optimální magnetizační frekvence. V tomto režimu přebĕhu přístroj automaticky zvolna zvyšoval magnetizační frekvenci od minima po nejvyšší dovolenou hodnotu a zaznamenal magnetoelastický parametr (mp) jako funkci frekvence. Magnetizační napětí bylo v průběhu tohoto přebĕhu konstantní. Tento postup byl proveden na vzorku číslo 7. [10].



Obrázek č. 14. – Graf č. 1. – Přebĕh magnetizačního napětí



Obrázek č. 15. – Graf č. 2. – Přeběh Magnetizační frekvence

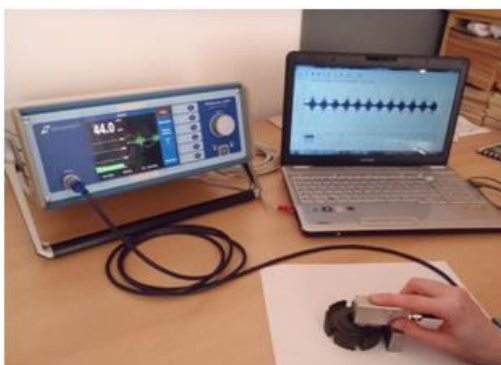
Na obrázcích číslo 14. a 15. jsou uvedeny grafy, z kterých bylo zvoleno optimální nastavení pro frekvenci a napětí. Zvolené hodnoty jsou v tabulce číslo 3.

Tabulka č. 3. – Zvolené hodnoty frekvence a napětí.

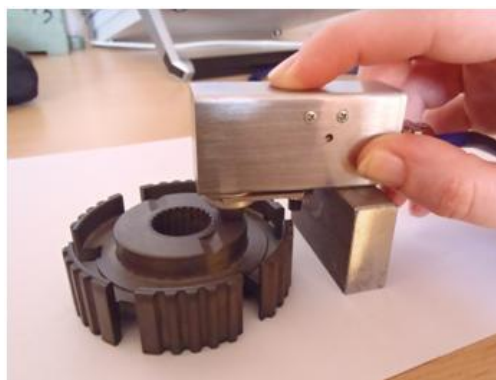
frekvence	125 Hz
napětí	4 V

3.1.3 Měření magnetoelastického parametru (mp)

Měření magnetoelastického parametru (mp) bylo provedeno přikládáním snímače na předem zvolené místo ve směru x (po směru obrábění) a ve směru y (kolmo na směr obrábění).



Obrázek č. 16. – Dokumentace průběhu měření



Obrázek č. 17. – Ukázka měření ve směru X

Měření bylo provedeno pro 16 vzorků jádra synchronní spojky s rozdílnými časy karbonitridace. Značení a doba karbonitridace je uvedena v tabulce číslo 4. Výsledky měření přístrojem Rollscan 300 jsou uvedeny v přílohách číslo 4. až 7. V tabulce číslo 5. jsou hodnoty, které byly použity ke konstrukci grafů zobrazených na obrázcích číslo 32. až 40.

Tabulka č. 4. – Značení vzorků

Vzorek č.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
doba KN (min)	40	40	60	60	80	80	100	100	120	120	140	140	160	160	0	0

Tabulka č. 5. – Měření magnetoelastického parametru (MP) pro vzorky č. 1, 3, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 13 a 15

	MP - směr měření X			MP - směr měření Y		
	Avg RMS	RMS -	RMS +	Avg RMS	RMS -	RMS +
vzorek č.15.	87,66	86,71	88,61	115,68	115,09	116,27
vzorek č.1.	56,86	55,52	58,20	75,98	67,83	84,13
vzorek č.3.	56,58	55,56	57,60	57,94	55,44	60,44
vzorek č.5.	49,60	48,23	50,97	50,60	49,95	51,25
vzorek č.7.	53,50	52,95	54,05	48,30	43,96	52,64
vzorek č.8.	39,82	39,34	40,30	49,44	45,96	52,92
vzorek č.9.	40,52	40,12	40,92	40,00	39,76	40,24
vzorek č.10.	42,90	42,52	43,28	40,62	40,41	40,83
vzorek č.11.	36,40	36,00	36,80	36,78	36,48	37,08
vzorek č.13.	38,56	38,27	38,85	40,08	39,17	40,99

3.1.4 Metalografie

3.1.4.1 Odběr vzorku

Odběr vzorku pro metalografii byl proveden na předem stanoveném místě (v místě, které bylo zvoleno při měření přístrojem Rollscan 300).

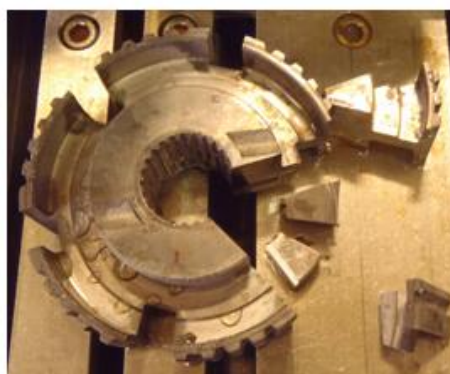
Vzorek byl odebrán vyříznutím části materiálu za pomoci Rozbrušovací pily - DELTA Abrasimet Cutter, firma Buehler (Obrázek č. 18.). Jako řezný nástroj byl použit řezný kotouč (obrázek č. 19.). Vzorek byl během řezání chlazen proudem vody, aby nedošlo k jeho ovlivnění teplem.



Obrázek č. 18. – Rozbrušovací pila



Obrázek č. 19. – Řezný kotouč



Obrázek č. 20. – označení místa řezu obrázek č. 21. – provedení řezu (Bláha 2012)

3.1.4.2 Zalisování vzorku

Zalisování vzorku bylo provedeno za tepla. Vzorek byl zalisován do dentakrylu za pomoci přístroje Buehlersimplimet 100.

Přístroj Buehlersimplimet 100 je automatický hydraulický lis na metalografické vzorky určený k zalisování vzorků do dentakrylu Endoplyn (p.Čílová, IV. 2012, in verb).

Po vložení vzorku do pracovního válce byl zasypán průhledným dentakrylem, označen číslem vzorku a dobou, při které probíhala karbonitridace a následně uzavřen.

Zalisování bylo provedeno tlakem 290 bar za teploty 180°C po dobu 4 min. Poté následovalo ochlazení po dobu 4 min, které bylo provedeno za pomoci vody.



Obrázek č. 22. – simpliment



Obrázek č. 23. – příprava vzorku k zasypání



Obrázek č. 24. – zasypání a označení vzorku



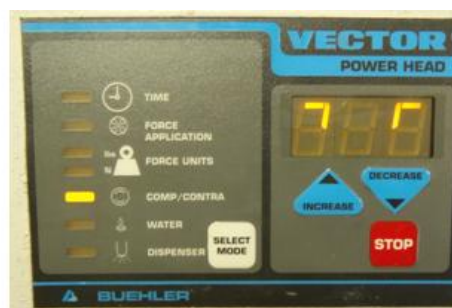
Obrázek č. 25. – finální preparace vzorku

3.1.4.3 Broušení a leštění vzorku

Pro broušení a leštění byl použit poloautomatický stroj Buehlerphoenix beta. Broušení bylo provedeno za pomoci sady brusných papírů. Při výměně brusného papíru, se důkladně opláchnul vzorek i veškeré funkční části přístroje, aby nedošlo k zanesení hrubších zrn do jemnějšího brusného papíru. Mohlo by tak dojít k poškrábání vzorku. K leštění bylo použito textilní plátno a speciální suspenze Polykrystalického diamantu s lubrikačním olejem. Po vyleštění vzorku byl vzorek opláchnut lihem a vysušen. Průběh jednotlivých kroků použitých při broušení a leštění je zahrnut v tabulce č. 6.



Obrázek č. 26. –
Buehlerphoenix beta



Obrázek č. 27. – řídicí panel



Obrázek č. 28. – sušení

Tabulka č. 6. – Přehled kroků pro broušení a leštění.

Four-Step Practice for Hard Steels using the BUEHLERHERCULES™ H Disc				
Surface	Abrasive/ Size	Load Lb. (N)/ Specimen	Base Speed (rpm)/Direction	Time (min:sec)
ULTRA-PREP™ Metal Bonded Disc	45µm diamond, water cooled	6 (27)	240-300 Comp.	Until Plane
BUEHLER HERCULES™ H Rigid Grinding Disc	9µm METADI® SUPREME Diamond Suspension*	6 (27)	120-150 Comp.	5:00
TRIDENT™ Cloth	3µm METADI® SUPREME Diamond Suspension*	6 (27)	120-150 Comp.	3:00
MICROCLOTH® NANOCLOTH™ or CHEMOMET® Cloths	MASTERPREP™ 0.05µm Alumina Suspension or MASTERMET® Colloidal Silica	6 (27)	120-150 Contra	2:00

*Plus METADI® Fluid extender as desired.
Comp. = Complementary (platen and specimen holder both rotate in the same direction)
Contra = Platen and specimen holder rotate in opposite directions

3.1.5 Metalografie jádra synchronní spojky

K vyhodnocení vzorku byl použit metalografický mikroskop Nikon EPIPHOT 200 připojený k počítači s nainstalovaným softwarem NIS – ElementsARV.3.1. Pomocí kamery byly pořízeny fotky struktur vzorků. Vzorek byl před pořízením snímků naleptán 3% roztokem kyseliny dusičné v alkoholu Nitalém, aby došlo k zvýraznění jeho struktury. Snímky byly pořízeny při 500násobném zvětšení.



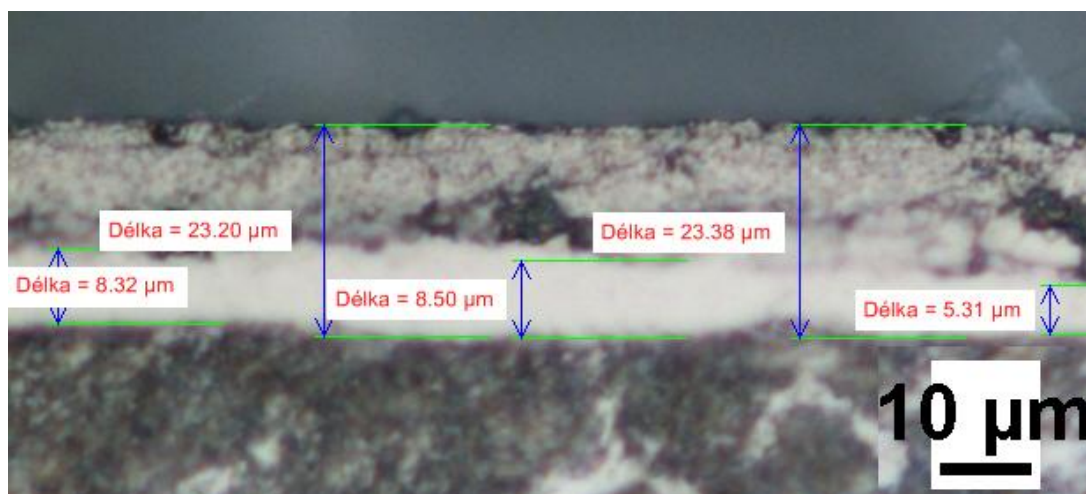
Obrázek č. 29. – Leptadlo (3% Nital), pinzeta, tampónky, denaturovaný líh



Obrázek č. 30. – Nikon EPIPHOT 200, software NIS-Elements AR 3.1

3.1.6 Měření karbonitridované vrstvy jádra synchronní spojky

Měření karbonitridované vrstvy bylo provedeno u deseti vzorků. Jedná se o vzorky číslo 1,3,5,7,8,9,10,11,13 a 15. Měření tloušťky karbonitridované vrstvy bylo provedeno při 500násobném zvětšení a výsledné hodnoty pro tyto vzorky jsou uvedeny v tabulce číslo 7. Měřena byla celková karbonitridační vrstva.



Obrázek č. 31. – vzorek č. 11, zvětšeno 500x, Nital, ukázka měření karbonitridované vrstvy

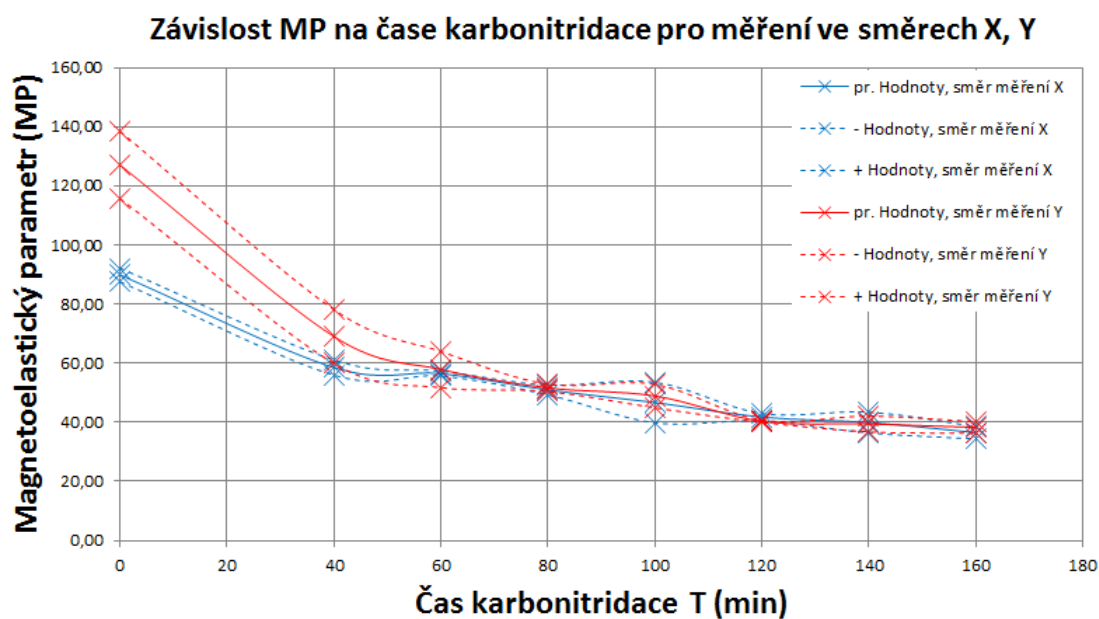
Tabulka č. 7. – Tloušťka karbonitridované vrstvy.

pořadí č.	měření č. 1.	měření č. 2.	měření č. 3.	měření č. 4.	měření č. 5.	průměr	odchylka	+	-
č.15.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
č.1.	3,72	3,72	3,16	2,60	3,16	3,27	0,42	3,69	2,85
č.3.	4,00	4,40	4,46	3,60	4,06	4,10	0,31	4,41	3,79
č.5.	6,56	6,42	7,09	6,16	6,69	6,58	0,31	6,89	6,28
č.7.	12,78	12,29	12,29	11,08	13,15	12,32	0,70	13,02	11,62
č.8.	13,27	14,01	14,16	14,75	13,71	13,98	0,49	14,47	13,49
č.9.	16,47	16,10	17,20	17,08	17,57	16,88	0,53	17,41	16,36
č.10.	17,08	17,70	17,57	17,70	17,45	17,50	0,23	17,73	17,27
č.11.	23,20	23,38	22,14	24,44	23,52	23,34	0,74	24,07	22,60
č.13.	23,02	24,26	24,26	24,09	23,58	23,84	0,48	24,32	23,36

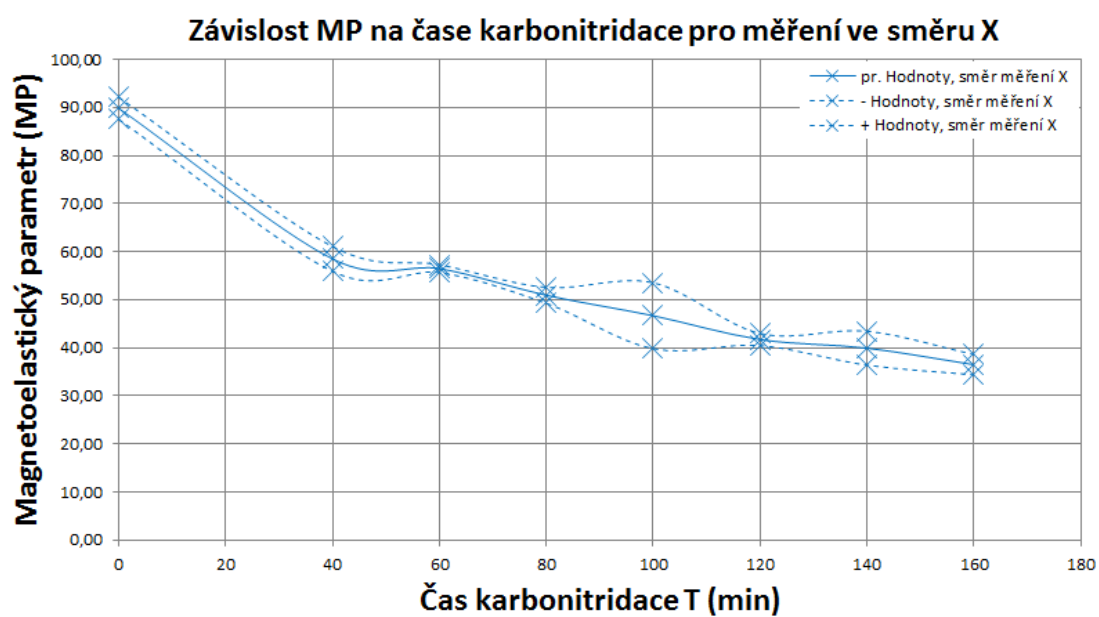
U obrázku číslo 31. si lze všimnout, že se karbonitridační vrstva skládá z neporézní (světlé) části tvořené karbonitridy a okrajové tmavší části, která je zasažena oxidací a tvoří ji oxykarbonitridy, postihuje asi 2/3 karbonitridační vrstvy. Z měření karbonitridační vrstvy lze říct, že vrstva zasažená oxidací se začíná objevovat, až při vyšších časech, při kterých probíhá karbonitridace. Čas, při kterém byla napadená vrstva oxidací zpozorována, začínal na 100 minutách.

3.1.7 Grafické řešení

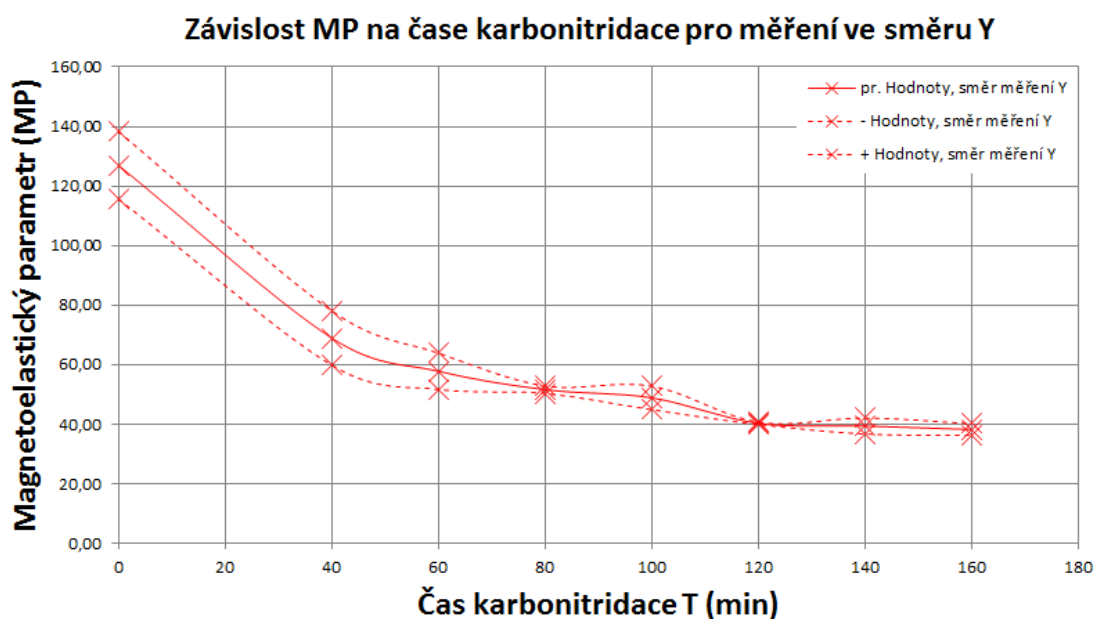
Na obrázcích číslo 32. až 34. jsou uvedeny grafy (Závislosti MP na čase karbonitridace). Tyto grafy byly vytvořeny z naměřených hodnot magnetoelastického parametru a čase, při kterém probíhala karbonitridace. Měření bylo provedeno u všech 16-ti vzorků.



Obrázek č. 32. – Graf č. 3.

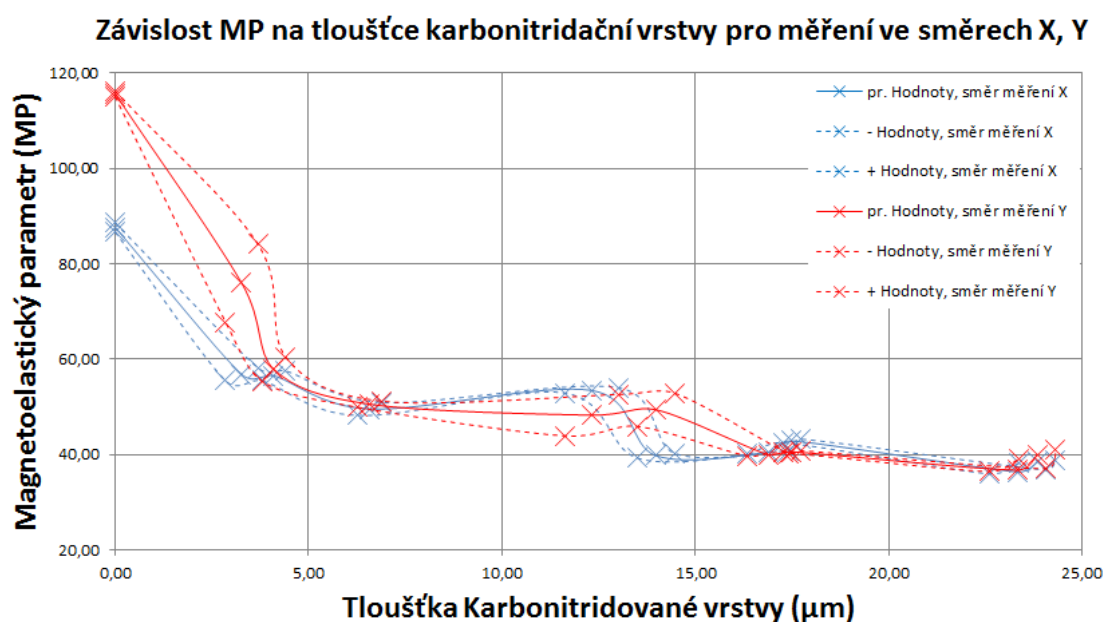


Obrázek č. 33. – Graf č. 4.

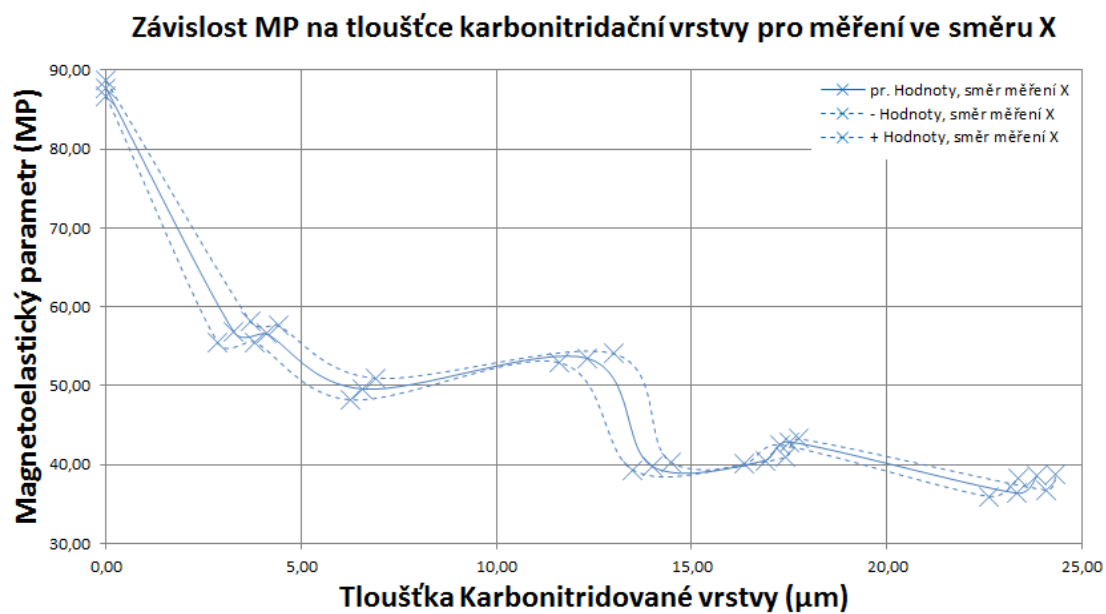


Obrázek č. 34. – Graf č. 5.

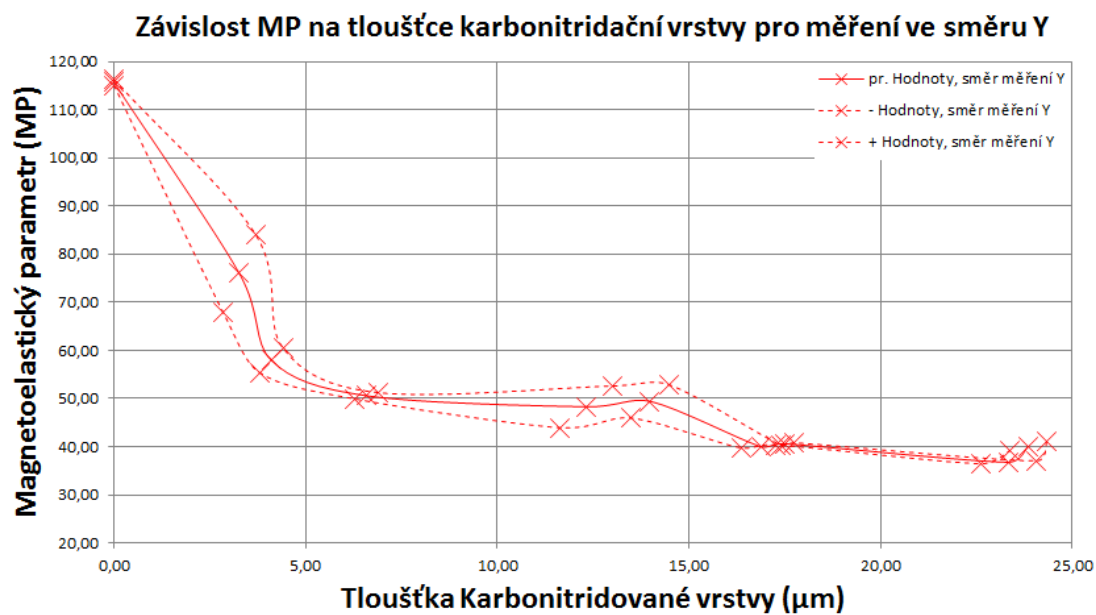
Dále na obrázcích číslo 35. až 37. jsou uvedeny grafy (Závislosti MP na tloušťce karbonitridované vrstvy). Tyto grafy byly vytvořeny z naměřených hodnot magnetoelastického parametru a tloušťky karbonitridované vrstvy u vzorků číslo 1,3,5,7,8,9,10,11,13 a 15.



Obrázek č. 35. – Graf č. 6.

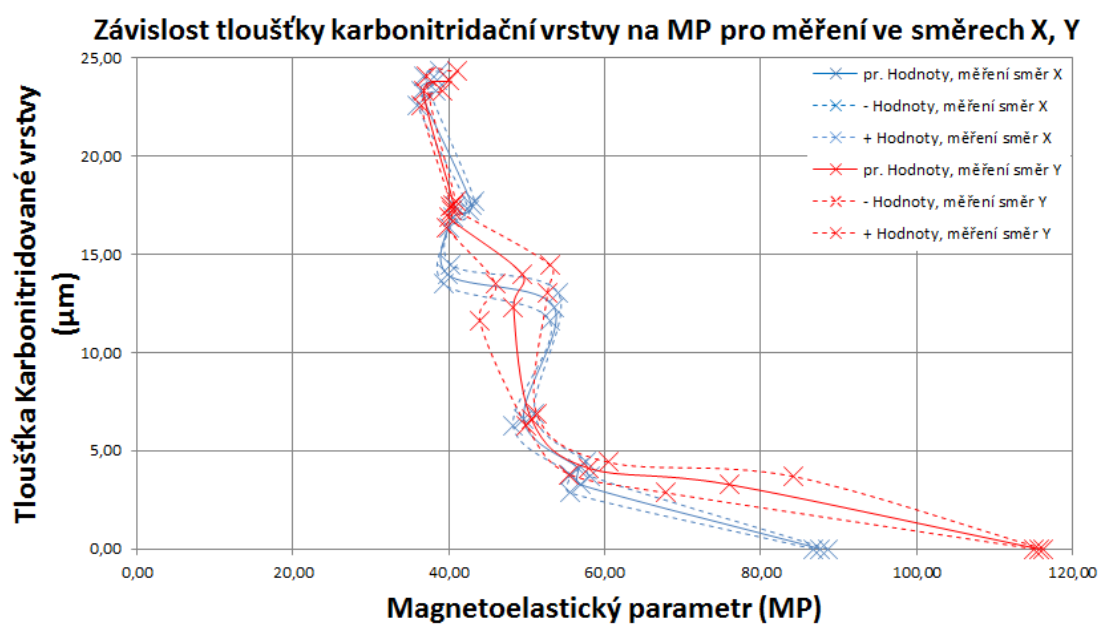


Obrázek č. 36. – Graf č. 7.

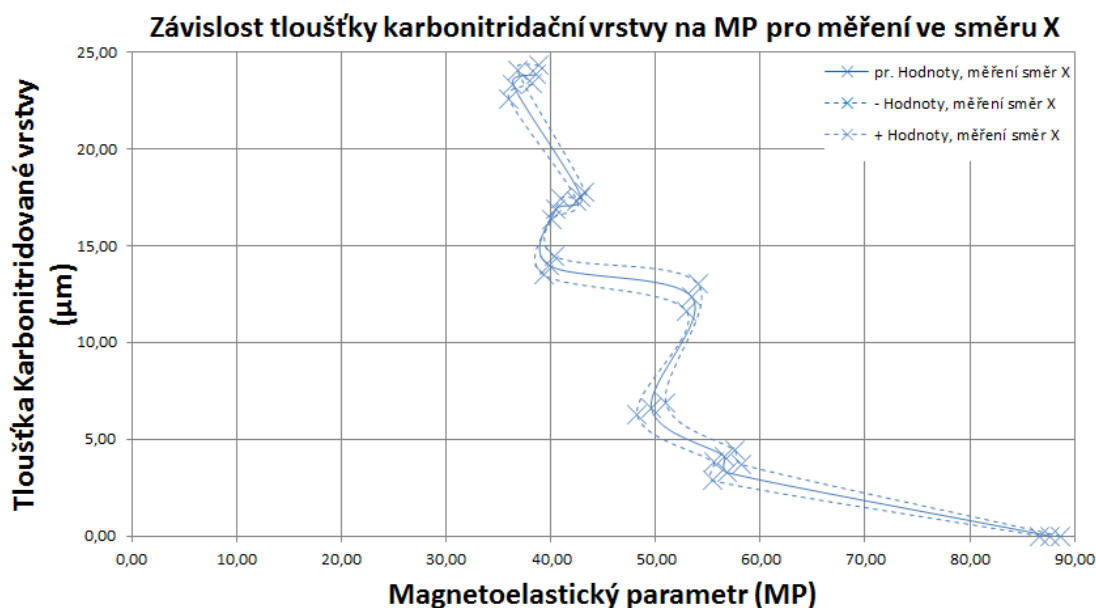


Obrázek č. 37. – Graf č. 8.

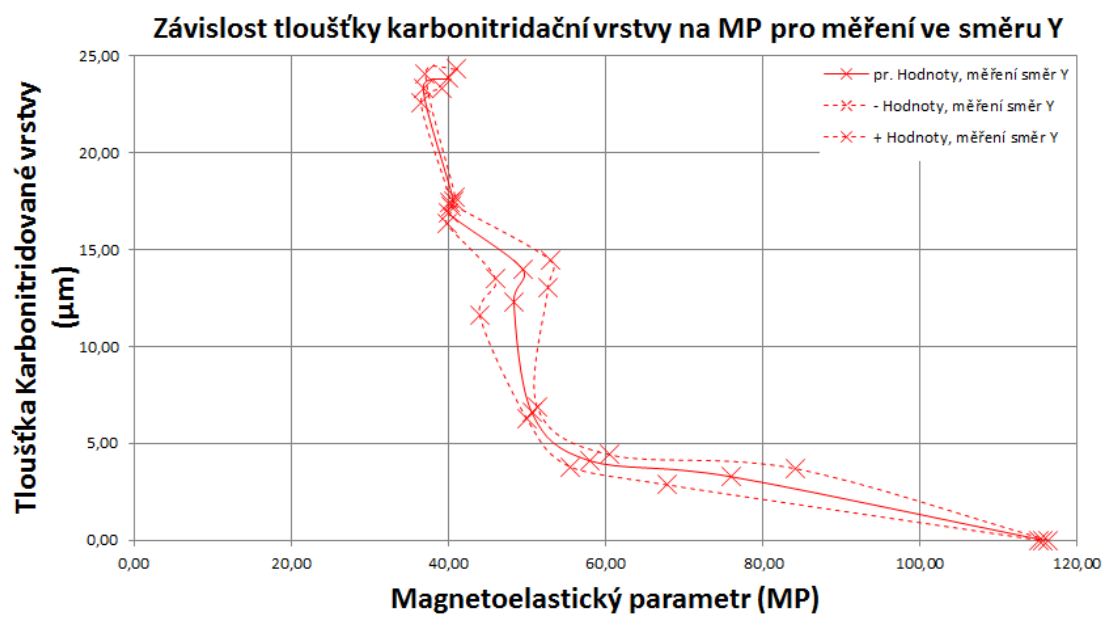
A na obrázcích číslo 38. až 40. jsou uvedeny grafy (Závislosti tloušťky karbonitridované vrstvy na MP). Tyto grafy byly vytvořeny z naměřených hodnot magnetoelastického parametru a tloušťky karbonitridované vrstvy u vzorků číslo 1,3,5,7,8,9,10,11,13 a 15.



Obrázek č. 38. – Graf č. 9.



Obrázek č. 39. – Graf č. 10.



Obrázek č. 40. – Graf č. 11.

5. Diskuse výsledků

Výsledné naměřené hodnoty jsou uvedeny v kapitole 3.1.7

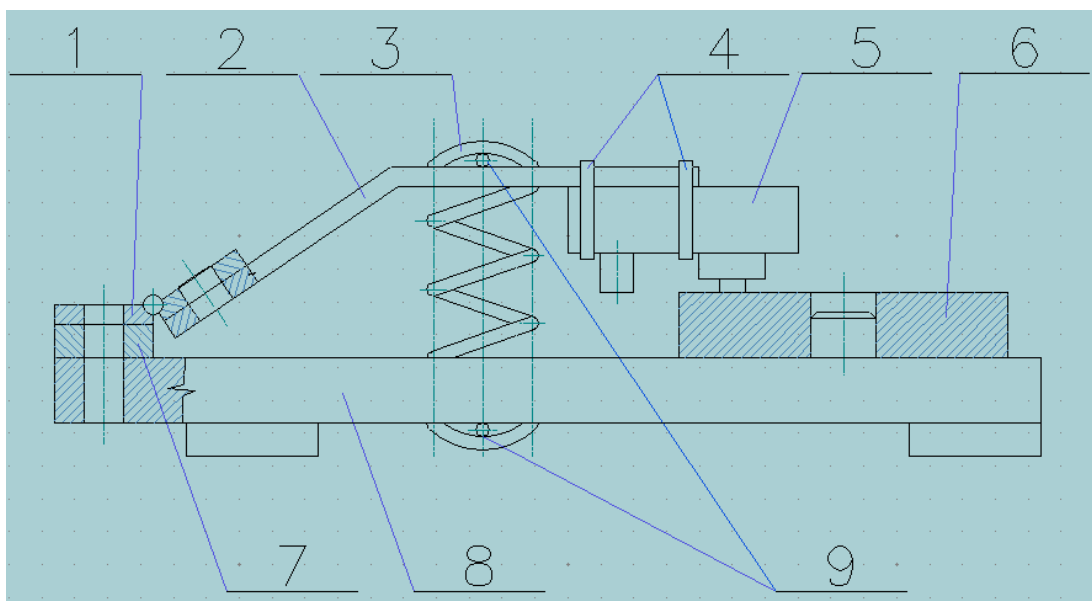
Grafy byly vytvořeny na základě výsledků z naměřených hodnot přístrojem Rollscan 300 a z metalografické analýzy.

S ohledem na měřenou vrstvu vzorku jádra synchronní spojky bylo nastavení Rollscanu 300 zvoleno: frekvence 125 Hz a napětí 4 V. Hodnoty magnetoelastického parametru jsou měřeny ve směru obrábění osy x a kolmo na směr obrábění osy y. V přílohách bakalářské práce číslo 4. až 7. si lze všimnout, že při krátkých časech karbonitridace byly naměřené hodnoty magnetoelastického parametru ve směrech x, y velice rozdílné a při vyšších časech karbonitridace se hodnoty téměř rovnají (směr obrábění už nemá na měření žádný vliv).

Na obrázku č. 32. až 34. jsou uvedeny grafy poklesu hodnot magnetoelastického parametru v závislosti na čase, při kterých probíhala karbonitridace. Z grafů je tedy patrné, že při delším průběhu karbonitridace klesala hodnota magnetoelastického parametru.

Na obrázcích č. 35. až 37. jsou uvedeny hodnoty magnetoelastického parametru v závislosti na tloušťce karbonitridační vrstvy. Dají se použít ke kontrole karbonitridační vrstvy jádra synchronní spojky. Pro lepší určení tloušťky karbonitridační vrstvy byly vytvořeny grafy závislosti tloušťky karbonitridační vrstvy na magnetoelastickém parametru uvedeny na obrázcích č. 38. až 40.

Z grafů jsou patrné velké odchylky měření. Odchylky byly zřejmě způsobeny vlivem třesoucí se ruky (tzn. nebyla zaručena konstantní přitlačná síla snímače na měřené místo jádra synchronní spojky) a části karbonitridované vrstvy zasažené oxidací. Proto bych doporučoval při měření magnetoelastického parametru použít přípravek zaručující konstantní přitlačnou sílu snímače na měřené místo jádra synchronní spojky. Na obrázku č. 41. je mnou navržený přípravek.



1. PANT; 2. RAMENO; 3. TAŽNÁ PRUŽINA; 4. UPEVNŮVACÍ PÁSKY; 5. SNÍMAČ; 6. JÁDRO SYNCHRONNÍ SPOJKY; 7. PODLOŽKA; 8. KOSTRA; 9. KOLÍK

Obrázek č. 41. – schéma přípravku

6. Závěr

S ohledem na měřenou vrstvu vzorku jádra synchronní spojky bylo nastavení Rollscanu 300 zvoleno: frekvence 125 Hz a napětí 4 V.

Na obrázcích č. 32. až 34. jsou uvedeny grafy, na kterých klesala hodnota magnetoelastického parametru v závislosti na čase, při kterých probíhala karbonitridace. Z grafů je tedy patrné, že při delším průběhu karbonitridace klesala hodnota magnetoelastického parametru.

Na obrázcích č. 35. až 37. jsou uvedeny hodnoty magnetoelastického parametru v závislosti na tloušťce karbonitridační vrstvy. Dají se použít ke kontrole karbonitridační vrstvy jádra synchronní spojky. Pro lepší určení tloušťky karbonitridační vrstvy byly vytvořeny grafy závislosti tloušťky karbonitridační vrstvy na magnetoelastickém parametru uvedeny na obrázcích č. 38. až 40.

Výsledné grafy se dají použít ke kontrole tloušťky karbonitridované vrstvy. Jedná se o nedestruktivní metodu. To znamená, že by při jejím používání nedocházelo k znehodnocování jader synchronní spojky. Tato metoda je vhodná pro sériovou výrobu.

7. Seznam použité literatury

- [1] ANONYMUS, 1997: Pro změny točivého momentu a otáček montuje ŠKODA do vozů OCTAVIA moderní plně synchronizované převodovky, online: <http://www.skolahostivar.cz/DownloadPF/18.pdf>, cit. 14. 04. 2012
- [2] ANONYMUS, 2010: - Rollscan 300, Uživatelská příručka, V1.6, Stresstechgroup
- [3] KRAUS V., 2006: Tepelné zpracování a slinování, přednášky, skripta ZČU Plzeň
- [4] LOUKOTOVÁ L., 2009: Metalografie, online: http://moa.zcu.cz/files/NPV/ppt/loukotova_prez.pdf, cit. 10.03.2012
- [5] MALEC J., 2006: Některé nepříliš známé pojmy (Barkhausenův šum), Strojírenská technologie, časopis pro vědu, výzkum a výrobu, Ročník XI, číslo 3
- [6] OCHODEK V., MALEC J., 2006: Využití Barkhausenova šumu ke kontrole a optimalizaci procesu broušení, Strojírenská technologie, časopis pro vědu, výzkum a výrobu, Ročník XI, číslo 3
- [7] PLUHAŘ J. a kol., 1989: Nauka o materiálech, Nakladatelství technické literatury Alfa, Praha
- [8] PTÁČEK L. a kol., 2003: Nauka o materiálu I., Akademické nakladatelství CERM s.r.o., Brno
- [9] PTÁČEK L. a kol., 1999: Nauka o materiálu II., Akademické nakladatelství CERM s.r.o., Brno
- [10] VRKOSLAVOVÁ L., GANEV N., SANTA-AHO S. aj., 2011: Comparative Study of Case-hardened and Nitrided Samples Using Barkhausen Noise Analysis and X-ray Diffraction, In: 9th International Conference on Barkhausen noise and Micromagnetic Testing, str. 105-114, ISBN 978-952-67247-4-4

8. Přílohy

Příloha č. 1. – materiálový list jádra synchronní spojky

Klass.-Nr. 51 32 1		May 2005
VOLKSWAGEN AG	Unalloyed Quenched and Tempered Steel Material Requirements	TL 1356
Konzernnorm		
<p>Descriptors: quenched and tempered steel, unalloyed, steel, synchronizer hubs</p> <p>Changes The following changes have been made as compared to Technical Supply Specification TL 1356, 1999-06: – Referenced standards updated</p> <p>Previous issues TL 1354 S: 1958-09, 1960-12, 1961-10, 1962-06, 1964-11, 1967-06, 1976-07, 1978-07, 1986-04. TL 1356: 1986-04, 1992-05, 1999-06</p> <p>1 Scope This Technical Supply Specification (TL standard) defines the material requirements for unalloyed quenched and tempered steel, e.g. for synchronizer hubs.</p> <p>2 Requirements</p> <p>2.1 General requirements Approval of first supply and changes according to Volkswagen standard VW 011 55. Avoidance of hazardous substances according to VW 911 01. Unless otherwise required by this Technical Supply Specification, the quality specifications of DIN EN 10083-2 are valid as relevant for the steel specified herein.</p> <p>2.2 Smelting process Electric steel-making process or basic oxygen steel-making process</p> <p>2.3 Grade Stainless steel</p> <p>2.4 Shape of application Forgings, steel bars</p>		
<p>Form EE 41 - 01.05</p> <p>Fachverantwortung/Responsibility K-QS-32/1 Dr. Reinhold Tel: -990537 Dr. Eisenberg</p>		<p>Normung/Standards (EZTD, 1733) Frau Hager-Sülß Tel: +49-5361-9-49035 Sobanski</p>

2.5 Chemical composition in weight percent

See Table 1.

Table 1

C	Si	Mn	P	S	Cr
0.50 to 0.55	0.15 to 0.35	0.65 to 0.90	≤ 0.035	0.060 to 0.080	≤ 0.2

2.6 Structure and physical properties

2.6.1 Microscopic purity grade

A₄ B₂ C₁ D₁;

according to JK scale (Jernkontoret's inclusion chart – Svensk Standard 111116 "Method for assessment of the content of non-metallic inclusions").

2.6.2 Macroscopic purity grade

Free of cracks and rolled slag lines, bar material must be suitable for forging.

2.6.3 Total characteristic value K (oxides)

For each individual melting charge. Test according to DIN 50602.

- Ø 50 mm K₄ ≤ 30
- Ø 51 mm to 130 mm K₄ ≤ 40

2.7 Hardenability

End quenching test according to DIN EN ISO 642.

J₁₀ at 830 °C/30 min: 26 to 34 HRC

2.8 Structure and tensile strength

See Table 2.

Table 2

As-received condition acc. to release	Structure	Tensile strength N/mm ²
normalized	lamellar pearlite, ferrite content > 15%; no distinct banded structure	690 to 810
coarse-grain annealed	lamellar pearlite, ferrite content > 15%; grain size acc. to ASTM E112: 1 to 4	690 to 810
forged-pearlitic ¹⁾	pearlite, ferrite content > 10%; grain size acc. to ASTM E112: 2 to 6	690 to 810
rolled pearlitic ¹⁾	generally only for dimensions > 40 mm Ø pearlite, ferrite content > 10%; desired grain size 2 to 6 acc. to ASTM E112	690 to 840
quenched and tempered	-	acc. to drawing
as-rolled	no requirements	no requirement

¹⁾ Air-cooling controlled by hot working heat.

3 Referenced standards¹⁾

VW 011 55	Vehicle Supply Parts; Approval of First Supply and Changes
VW 911 01	Environmental Standard for Vehicles; Vehicle Parts, Materials, Operating Fluids; Avoidance of Hazardous Substances
DIN 50602	Metallographic Examination; Microscopic Examination of Special Steels using Standard Diagrams to Assess the Content of Non-Metallic Inclusions
DIN EN 10083-2	Quenched and Tempered Steels, Part 2: Technical Delivery Conditions for Non-Alloy Steels
DIN EN ISO 642	Steel; Hardenability Test by End Quenching (Jominy Test)
ASTM E 112	Standard Test Method for Determining Average Grain Size

¹⁾ In this section, terminological inconsistencies may occur as the original titles are used.

Příloha č. 4. – Hodnoty naměřené přístrojem Rollscan 300

Vzorek č. 1.	Pořadí č.3.				x	y
	RMS avg	RMS -	RMS +		RMS avg	RMS avg
x	58,6	58,5	58,7		56,86	75,98
x	55,1	54	56,2	směrodatná odchylka	1,34	8,15
x	55,7	55,7	55,7	RMS +	58,20	84,13
x	58,1	58,3	57,9	RMS -	55,52	67,83
x	56,8	56	57,7			
y	82,9	84,7	81,2			
y	82,2	83,9	80,5			
y	82	82,9	81,1			
y	70	71,2	68,7			
y	62,8	63,9	61,6			
Vzorek č. 2.	Pořadí č.4.				x	y
	RMS avg	RMS -	RMS +		RMS avg	RMS avg
x	62,2	62,2	62,3		60,08	61,94
x	62,1	60,9	63,3	směrodatná odchylka	2,52	0,83
x	60,3	60,4	60,2	RMS +	62,60	62,77
x	60,5	61,4	59,7	RMS -	57,56	61,11
x	55,3	53,9	56,7			
y	62,5	62,9	62,1			
y	62,3	62,1	62,4			
y	62,5	62,1	62,9			
y	62,1	62,9	61,3			
y	60,3	59,8	60,8			
Vzorek č. 3.	Pořadí č.5.				x	y
	RMS avg	RMS -	RMS +		RMS avg	RMS avg
x	58,1	56,5	59,6		56,58	57,94
x	56,1	56,6	55,6	směrodatná odchylka	1,02	2,50
x	57	56,5	57,5	RMS +	57,60	60,44
x	56,7	54,8	58,6	RMS -	55,56	55,44
x	55	53,9	56			
y	61,8	63,3	60,4			
y	59,5	60,6	58,5			
y	56,1	57,2	55,1			
y	57,6	58,8	56,4			
y	54,7	55,1	54,3			
Vzorek č. 4.	Pořadí č.6.				x	y
	RMS avg	RMS -	RMS +		RMS avg	RMS avg
x	57,1	54,5	59,8		56,36	65,06
x	56,7	53,9	59,4	směrodatná odchylka	0,49	6,56
x	55,8	52,9	58,8	RMS +	56,85	71,62
x	55,9	54,1	57,7	RMS -	55,87	58,50
x	56,3	54,6	57,9			
y	70,5	72,9	68,1			
y	70,5	72	69			
y	70	71,5	68,4			
y	58,9	59,7	58,2			
y	55,4	55,7	55,1			

Příloha č. 5. – Hodnoty naměřené přístrojem Rollscan 300

Vzorek č. 5.	Pořadí č.7.				x	y
	RMS avg	RMS -	RMS +		RMS avg	RMS avg
x	51,6	51,1	52		49,60	50,60
x	49,9	50	49,8	směrodatná odchylka	1,37	0,65
x	50,3	50,1	50,6	RMS +	50,97	51,25
x	48,5	48,4	48,6	RMS -	48,23	49,95
x	47,7	47,5	47,8			
y	50	51,5	48,6			
y	51,8	53	50,7			
y	50,7	52,3	49,1			
y	50,1	50,7	49,5			
y	50,4	52,1	48,6			
Vzorek č. 6.	Pořadí č.8.				x	y
	RMS avg	RMS -	RMS +		RMS avg	RMS avg
x	52,1	53,1	51		52,22	52,66
x	52,3	53,4	51,2	směrodatná odchylka	0,42	0,72
x	52,2	52,8	51,5	RMS +	52,64	53,38
x	52,9	54,3	51,5	RMS -	51,80	51,94
x	51,6	52	51,2			
y	51,8	49,9	53,8			
y	53,5	51,6	55,4			
y	52,7	51,7	53,6			
y	51,9	50,7	53,2			
y	53,4	53,1	53,7			
Vzorek č. 7.	Pořadí č.9.				x	y
	RMS avg	RMS -	RMS +		RMS avg	RMS avg
x	54,1	52,6	55,6		53,50	48,30
x	54	52,9	55	směrodatná odchylka	0,55	4,34
x	52,6	52	53,3	RMS +	54,05	52,64
x	53,6	53	54,1	RMS -	52,95	43,96
x	53,2	52,2	54,3			
y	53	53,2	52,8			
y	52,2	53,2	51,2			
y	50	50,6	49,4			
y	43,8	44,2	43,3			
y	42,5	42,3	42,8			
Vzorek č. 8.	Pořadí č.10.				x	y
	RMS avg	RMS -	RMS +		RMS avg	RMS avg
x	39,2	37,5	40,9		39,82	49,44
x	40,4	38,2	42,6	směrodatná odchylka	0,48	3,48
x	39,3	37,9	40,6	RMS +	40,30	52,92
x	40	38,2	41,9	RMS -	39,34	45,96
x	40,2	39	41,5			
y	42,5	42,3	42,8			
y	50,9	51,3	50,6			
y	51,5	52,1	50,9			
y	51,3	52,2	50,5			
y	51	52	50			

Příloha č. 6. – Hodnoty naměřené přístrojem Rollscan 300

Vzorek č. 9.	Pořadí č.11.				x	y
	RMS avg	RMS -	RMS +		RMS avg	RMS avg
x	40,4	39	41,7		40,52	40,00
x	39,8	38,7	40,9	směrodatná odchylka	0,40	0,24
x	40,8	39,2	42,4	RMS +	40,92	40,24
x	40,7	39,1	42,4	RMS -	40,12	39,76
x	40,9	41,1	40,7			
y	40,3	41,4	39,1			
y	39,8	41	38,6			
y	39,8	39,9	39,6			
y	40,3	40,6	40,1			
y	39,8	39,7	39,9			
Vzorek č. 10.	Pořadí č.12.				x	y
	RMS avg	RMS -	RMS +		RMS avg	RMS avg
x	42,2	41,8	42,6		42,90	40,62
x	43,3	42,1	44,4	směrodatná odchylka	0,38	0,21
x	43,1	43,2	42,9	RMS +	43,28	40,83
x	43,1	42,1	44	RMS -	42,52	40,41
x	42,8	42,2	43,4			
y	40,3	39,5	41,1			
y	40,6	40,9	40,3			
y	40,8	41	40,5			
y	40,9	42,3	39,5			
y	40,5	40,9	40			
Vzorek č. 11.	Pořadí č.13.				x	y
	RMS avg	RMS -	RMS +		RMS avg	RMS avg
x	35,8	35,5	36,1		36,40	36,78
x	36,5	36,5	36,4	směrodatná odchylka	0,40	0,30
x	36,7	36,6	36,9	RMS +	36,80	37,08
x	36,1	35,4	36,8	RMS -	36,00	36,48
x	36,9	36,2	37,5			
y	36,2	37,8	34,6			
y	36,8	38,3	35,3			
y	36,9	37,9	35,9			
y	37	38,8	35,2			
y	37	37,8	36,1			
Vzorek č. 12.	Pořadí č.14.				x	y
	RMS avg	RMS -	RMS +		RMS avg	RMS avg
x	44	42,1	45,9		43,42	42,06
x	43,9	41,8	46	směrodatná odchylka	0,45	0,49
x	42,9	41,1	44,7	RMS +	43,87	42,55
x	43	42	43,9	RMS -	42,97	41,57
x	43,3	41,3	45,3			
y	41,7	42	41,4			
y	41,7	41,7	41,7			
y	42,5	42,6	42,4			
y	41,6	42,1	41,2			
y	42,8	43,6	41,9			

Příloha č. 7. – Hodnoty naměřené přístrojem Rollscan 300

Vzorek č. 13.	Pořadí č.15.				x	y
	RMS avg	RMS -	RMS +		RMS avg	RMS avg
x	38,6	38,9	38,3		38,56	40,08
x	38,4	37,8	39,1	směrodatná odchylka	0,29	0,91
x	39,1	39	39,1	RMS +	38,85	40,99
x	38,4	38,2	38,6	RMS -	38,27	39,17
x	38,3	38,7	38			
y	39,3	41,1	37,4			
y	40	42,3	37,8			
y	38,9	40,1	37,7			
y	40,9	43,7	38			
y	41,3	44,8	37,8			
Vzorek č. 14.	Pořadí č.16.				x	y
	RMS avg	RMS -	RMS +		RMS avg	RMS avg
x	34,6	33,7	35,4		34,40	36,40
x	34,7	33,8	35,6	směrodatná odchylka	0,46	0,21
x	34,5	34,1	34,8	RMS +	34,86	36,61
x	33,5	33,5	33,5	RMS -	33,94	36,19
x	34,7	34,1	35,4			
y	36,8	37,5	36,1			
y	36,3	37	35,6			
y	36,2	37,4	35			
y	36,4	37,6	35,2			
y	36,3	37,6	35			
Vzorek č. 15.	Pořadí č.1.				x	y
	RMS avg	RMS -	RMS +		RMS avg	RMS avg
x	89,2	85,7	92,7		87,66	115,68
x	87,8	82,8	92,8	směrodatná odchylka	0,95	0,59
x	86,6	82,4	90,9	RMS +	88,61	116,27
x	88	83,2	92,8	RMS -	86,71	115,09
x	86,7	83,3	90,1			
y	116,5	113	120,1			
y	115,5	112,2	118,9			
y	116,2	116,7	115,8			
y	114,9	114,3	115,5			
y	115,3	113,3	117,3			
Vzorek č. 16.	Pořadí č.2.				x	y
	RMS avg	RMS -	RMS +		RMS avg	RMS avg
x	91,5	84,3	98,6		91,96	138,32
x	91,9	86,2	97,6	směrodatná odchylka	0,65	1,17
x	92,1	89,5	94,7	RMS +	92,61	139,49
x	91,2	88	94,4	RMS -	91,31	137,15
x	93,1	88	98,2			
y	140,2	144	136,3			
y	137	136,8	137,3			
y	137,6	141,1	134			
y	139,1	143,1	135,1			
y	137,7	140,3	135,1			